

Damhistorikk og instrumentering

Evaluering og dokumentering av eksisterende dammers sikkerhet

Innhold

1	Bakgrunn	4
2	Regelverk i Norge	6
2.1	Krav på instrumentering og dokumentasjon.....	7
2.2	Periodisk tilsyn og revurdering.....	8
2.3	Praksis.....	9
2.3.1	Deformasjonsmålinger	9
2.3.2	Lekkasjemåling	11
2.3.3	Databearbeiding	11
2.3.4	Andre målinger	12
2.3.5	Dispensasjon.....	13
3	Kostnader	14
3.1	Installasjon.....	14
3.2	Drift og databearbeidning	15
4	Instrumentering.....	16
4.1	Deformasjonsmålinger	17
4.1.1	Tradisjonelle målemetoder	19
4.1.2	Nyere teknikker	19
4.1.3	Spesielle målemetoder	24
4.2	Lekkasjemåling	26
4.2.1	Tradisjonelle metoder	26
4.2.2	Nyere teknikker	28
5	Bearbeiding av data.....	32
5.1	Etablering av grenseverdier.....	34
6	Internasjonal praksis	36
6.1	Instrumentering.....	36
6.2	Oppfølging og bruk.....	37
7	Konklusjoner.....	38
8	Referanser	39

Sammendrag

Damhistorikk og bruk av instrumentering er en del av prosjektet «Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv» som er ledet av Energi Norge. Denne rapporten ser på hvordan instrumentering og undersøkelsesmetoder brukes i Norge, og trekker noen paralleller til instrumentering internasjonalt med fokus på instrumenter, metoder og praksis.

I kapittel to diskuteres praksis i Norge basert på intervju med konsulenter som arbeider med revurderinger og tiltak for betong- og fyllingsdammer. Herunder presenteres målemetoder som er i bruk i Norge i dag med en kort redegjøring for hvordan data samles inn og bearbeides. Praksis med dispensasjon ses også over i korthet.

Kostnadsbildet i Norge vedrørende installasjon og drift av instrumentering presenteres i kapittel tre. Undersøkelsene er basert på innsamlet statistikk av nyere anlegg som er bygget eller rehabilitert.

Tilgjengelige instrumenteringsmetoder summeres deretter opp i kapittel fire, inndelt i deformasjon- og lekkasjemålinger. Her deles metodene opp i a) etablerte, tradisjonelle metoder, b) nyere teknikker og c) spesielle målemetoder. Innen instrumentering har det vært en kontinuerlig utvikling, der det finnes et flertall av instrumenter og målemetoder som ikke benyttes i større utstrekning i Norge i dag. Metodenes brukbarhet undersøkes i forhold til damsikkerhetsarbeidet og presenteres med estimerte kostnader for sammenligning.

I kapittel fem fokuseres det på etterarbeid og analyse. Data skal samles inn fra instrumenter og målinger, kvalitetssikres, sammenstilles og analyseres. Fremveksten av høyoppløselige dataserier med hyppige målinger stiller stadig større krav til analyseverktøy noe som byr på utfordringer i forhold til manuelle metoder. En oversikt over kjente analyseprogrammer presenteres, men listen skal ikke ses på som komplett.

Praksisen for instrumentering ses over i kapittel seks, der norsk praksis settes i perspektiv til virksomhet internasjonalt. En sjablonmessig sammenligning av kostnadsnivået gjøres.

Rapporten avsluttes med konkrete tiltak som kan gjøres for å forbedre dagens praksis og integrere instrumentering og data fra denne i damsikkerhetsvirksomheten.

1 Bakgrunn

Overvåkning av dammer og tilstandskontroll er en viktig del av damsikkerheten. I tillegg til damsikkerhetsforskriften som gir klare instruksjoner om instrumentering av dammer i Norge har man NVEs retningslinjer som gir veiledning og støtte i opprettelsen av et program for tilstandskontroll.

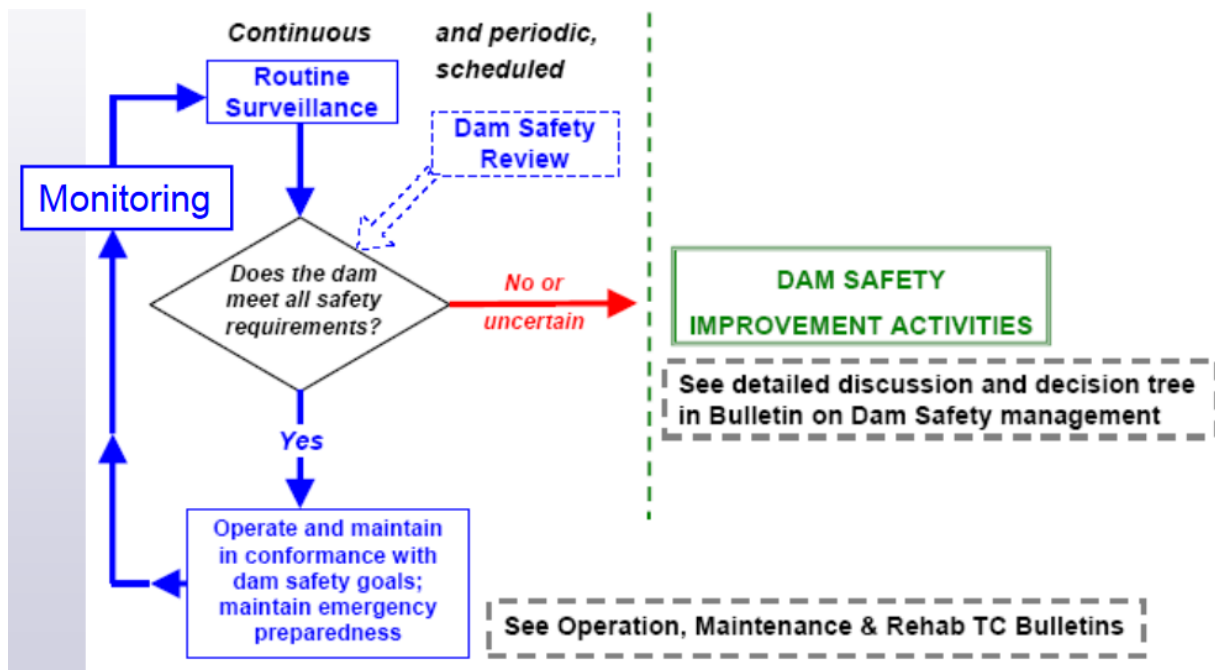
Overvåkningen er todelt, der dammen først og fremst skal sikres mot dambrudd. Sekundært, men vel så viktig for dameieren, er å sikre full funksjonalitet av dammen.

Disse to målene bør bestemme hva slags data som samles inn, frekvensen og hvordan dataene behandles.

I programmet skal det være innarbeidede rutiner for å sikre at innsamlede data er verifiserbare og gir et korrekt bilde av dammens tilstand til enhver tid. Avvik skal noteres og undersøkes slik at tiltak kan settes inn i tide for å forhindre negativ utvikling. På denne måten kan en korrekt tilstandskontroll ikke bare gi en bedret damsikkerhet, men også bidra til å redusere vedlikeholdskostnadene. Når skader identifiseres tidlig og skadeårsakene kartlegges, kan man stoppe en skade fra å øke i omfang, og dermed redusere kostnaden med mottiltak.

Enhver dam har sine unike problemstillinger og krav til instrumentering og oppfølging. Selv om det finnes generelle behov og løsninger, er viktigheten og prioriteringen forskjellig fra dam til dam.

Utviklingen av et tilstandskontrollprogram krever at kompetanse samles. Arbeidsgruppen bør innbefatte personer med kunnskap om dammens oppbygning, lokale geotekniske og geologiske forhold, drift og vedlikehold, ansvarlig for instrumentering/kontroll samt en som har forståelse av samspillet mellom dammen og instrumenteringen. Spesialistene i gruppen bør arbeide systematisk med å ta frem et tilpasset program for tilstandskontroll for den gitte dammen.



Figur 1 Damsikkerhetsarbeide og instrumentering (ICold-bulletin 138, 2008).

I internasjonal praksis er koblingen mellom instrumentering og tilstandskontrollen mer markert. Instrumenteringsplanen er oftest individuelt tilpasset og kommer som et resultat av behov man legger til grunn for tilstandskontrollen.

Tabell 1 10 steg for opprettelse av tilstandskontroll. Modifisert Dunicliff 1993 (DSIG, 2013)

STEG	BESKRIVELSE
1	Samle inn, analysere informasjon
2	Identifisere tenkbare dambrudds-modi
3	Identifisere målinger som kan og bør utføres
4	Prosjektere instrumenteringssystem
5	Planlegge installasjon, kalibrering, datainnsamling, vedlikehold og datahåndtering
6	Kjøpe inn, installere, teste og idriftsette systemet
7	Vedlikeholde og kalibrere instrument
8	Samle inn, bearbeide og kvalitetssikre data
9	Tolke og rapportere resultat
10	Tiltak ved behov

For eldre dammer er ofte ikke de opprinnelige damkonstruktørene tilgjengelige. I tillegg ble dammene ikke dokumentert på samme måte som i dag, slik at det oppstår usikkerhet om dammens oppbygning, grunnforhold og dermed hvilke tenkelige dambruddsforløp som eksisterer. I disse tilfeller er det ekstra viktig å fremskaffe kompetente personer og egnede metoder som kan vurdere funksjon, forhold inne i dammen, tidligere erfaringer fra driften samt vurdere eksisterende og historiske data. Som et eksempel gir ICOLDs bulletin 154 en oversikt over feilmodi, mens bulletin 164 dekker potensielle feilmodi for fyllingsdammer. I tillegg er det viktig å ha oversikt over tilgjengelige metoder for å skaffe til veie informasjon om dammens konstruktive kvaliteter.

Tradisjonelt har verifikasjon vært en mekanisk prosess der fyllingsdammer graves opp med prøvegroper og sonderes med bor, betongkjerner tas ut fra betongdammer for testing etc. I dag finnes det ikke-destruktive alternativ som kan supplere eller til dels erstatte disse tilnærmingene.

2 Regelverk i Norge

Regelverket i Norge oppfyller internasjonal mønsterpraksis (s.k. best practice) for nye dammer. Dette gjelder også gjeldende bestemmelser i damsikkerhetsforskriften, § 7-2 om overvåking (interntilsyn og instrumentering) samt retningslinjer for tilsyn og revurdering samt overvåking og instrumentering.

For eksisterende dammer benyttes i dag samme tilnærming som for nye dammer, noe som ikke alltid er ideelt. Dette er utpekt som et hovedpunkt i en nylig utført evaluering (OED, 2014), som konkluderer med at konsekvenser av endringer i regelverket ofte ikke er utredet. Dette kan medføre at endret veileder og praksis dermed ikke blir samfunnsøkonomisk.

Vassdragsanlegg skal overvåkes slik at forhold som kan føre til reduksjon av anleggets sikkerhet kan avdekkes så tidlig som mulig. Overvåkingen skal tilpasses det aktuelle vassdragsanlegget, konsekvensklasse, materialsvekkelse, innsamling av data for revurdering og ellers andre sikkerhetsmessige forhold.

Videre skal en plan for dette foreligge skriftlig. Planen, som skal beskrive interntilsyn, instrumentering og målinger, grenseverdier for aktuelle måleparametere, jf. § 7-4 og ellers annen overvåking som den ansvarlige anser nødvendig. Alle resultat skal kunne være tilgjengelig for NVE på forespørsel.

Et av punktene i Prosjekt damsikkerhet (NVE, 1992) sier at nye krav til eksisterende dammer i første rekke bør være krav som sikrer overvåking av dammene, mens de fleste nye eller skjerpede kravene i de påfølgende årene er av strukturell art. Dette har også formet NVEs fokus og interaksjon med dameierne. Kontrasten er stor om man sammenligner med arbeidet som gjøres innen hydrologi. Her har fokus på datainnsamling og kvalitetssikring vært tydelig og gitt resultat.

2.1 Krav på instrumentering og dokumentasjon

Dokumenter som omhandler overvåking og instrumentering av vassdragsanlegg er som følger:

- Teknisk plan som inneholder plan for instrumentering sendes til NVE for godkjenning ved bygging og fornyelse av vassdragsanlegg.
- Overvåkingsplan som beskriver interntilsyn, instrumentering og målinger, grenseverdier for aktuelle måleparametere, jf. § 7-4 og ellers annen overvåking som den ansvarlige anser nødvendig som f.eks. videoovervåking.
- Revurderinger med en grundig undersøkelse og tilstandsanalyse klarlegger om anlegget har et tilfredsstillende sikkerhetsnivå. Revurderingsrapport sendes NVE til godkjenning

Alle dammer i klasse 2 og oppover skal ha vannstands og lekkasjemåling. I tillegg skal følgende instrumentering foreligge:

Tabell 2 Påkrevd instrumentering etter forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (etter damsikkerhetsforskriften).

Damtype	Fundament	Klasse	Deformasjoner	Poretrykk
Fyllingsdam	På god berggrunn	2-4	X	
	Løsmasser eller svakhetssoner	2-4		X
Betong- og murdam	På god berggrunn	3, 4	X	
	Løsmasser eller svakhetssoner	3, 4	X	X
		2		X

Forskriften angir at «Måleinstrumenter og andre måleinnretninger skal være driftssikre, nøyaktige og lette å avlese og skal være plassert slik at de gir representative måleverdier. Systemet for overføring ... skal være sikret mot funksjonssvikt. Måleinstrumenter, måleinnretninger, system for overføring av signaler og måleverdier skal kontrolleres jevnlig ...».

NVE har utarbeidet følgende veiledende oversikt for hyppighet av datainnsamling. Veiledningen er delt inn i ulike instrumenteringer for fyllingsdammer samt betong- og murdammer, med unntak av gravitasjonsdammer som ikke har noen veiledende krav til instrumentering.

Tabell 3 Hyppighet for avlesning etter Retningslinjer for overvåking og instrumentering. KO: Kontinuerlig overvåking, KM: Kontinuerlig måling. Avlesning utføres minst én gang i året. PT: Måling og avlesning utføres minst én gang i året, normalt i forbindelse med periodisk tilsyn, HT: Måling og avlesning utføres ved hovedtilsyn.

Damtype		Klasse	Lekasje	Poretrykk	Deformasjoner	Setninger	Vannstand
Fyllingsdammer	Fyllingsdammer med tetningskjerne av morene/asfaltbetong	3	KO		HT	PT	KO
		2	KM		HT	PT	KM
	Fyllingsdammer med tetning av betong, tre eller lignende	3	KM		HT		KO
		2	KM		HT		KM
	Fyllingsdammer fundamentert på løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner	3	KO	KM	HT	PT	KO
		2	KM	KM	HT	PT	KM
Betong- og murdammer	Plate-, lamell-, flerbue- og tørrmurte dammer	3	PT		HT		KO
		2	PT				PT
	Hvelvdammer	3	PT		PT		KO
		2	PT				PT
	Betong- og murdammer på løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner	3	KO	KM	HT		KO
		2	KM	KM			KM
Dammer med luker i flomløpet		3					KO
		2					KO

Veiledningen er tenkt som et minimum, der metode kan tilpasses dammens forhold.

2.2 Periodisk tilsyn og revurdering

NVE har krav om årlig periodisk tilsyn, hovedtilsyn hvert 5. år for klasse 2-4 anlegg (7 for klasse 1) og revurdering minst hvert 15. år (20 for klasse 1). I tillegg skal det gjøres spesielt tilsyn etter alle større belastningstilfeller (som f.eks. flommer). I forbindelse med revurderingen kontrolleres bl.a. dammens instrumentering opp mot kravene i damsikkerhetsforskriften som ble skjerpet betydelig i 2010.

Praksis er at man i dag kontrollerer dammens konstruktive element mot de som foreligger i veilederen. Der dammens oppbygning ikke fysisk møter standarden satt i veilederen foreslås utbedringer for å ruste dammen opp tilsvarende. Det er ikke vanlig praksis å se etter alternative løsninger som kan oppfylle samme funksjonalitet, noe som etterlyses i studien fremtidige oppgraderingsbehov av dammer (EnergiNorge, 2015). Denne studien analyserer også rehabiliteringer i Norge og viser at de hyppigst forekommende årsakene til rehabilitering for stenfyllingsdammer er manglende plastring i nedstrøms skråning, manglende fribord og for liten kronebredde. For betongdammer er det manglende stabilitet som er utløsende årsak.

Foreslått rehabilitering påvirker ofte instrumenteringen direkte. En del av tiltakene for å utbedre dette fører til krav om ny instrumentering da eksisterende lekkasjeoppsamlingsanlegg må flyttes eller setningsbolter må erstattes.

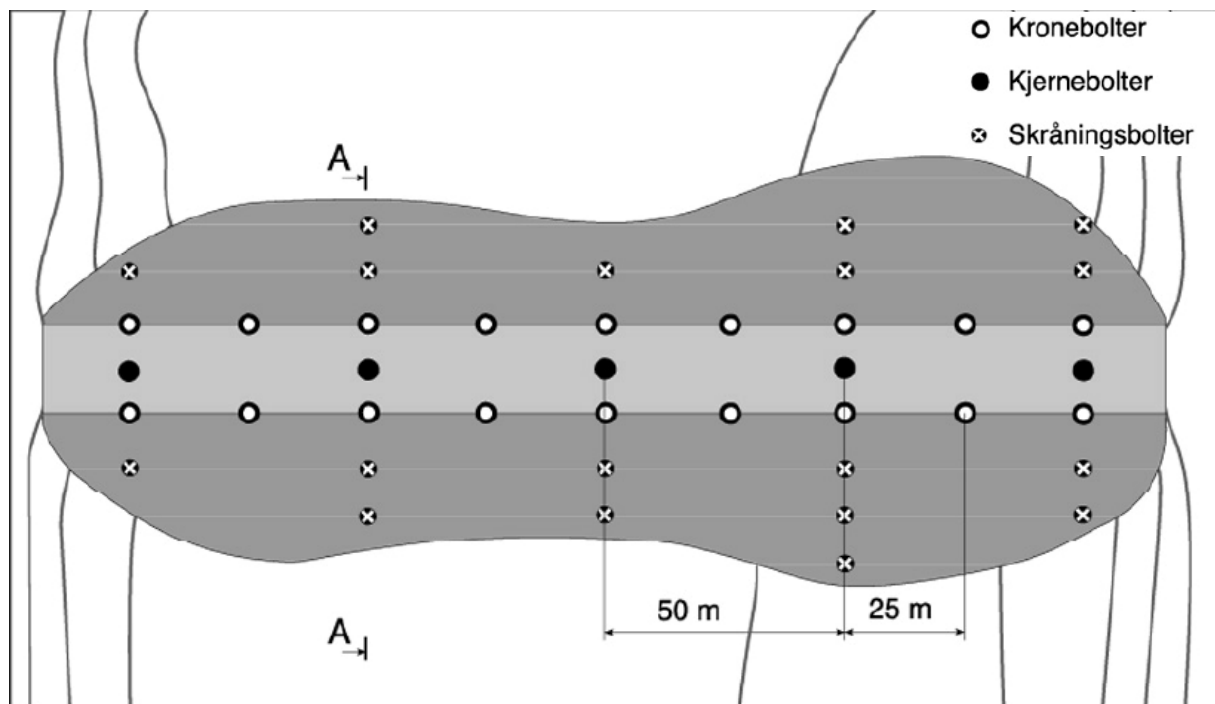
2.3 Praksis

I dag er det nesten ingen nye dammer som bygges i Norge, så fokuset her blir på instrumentering og datahåndtering. For eksisterende dammer kommer instrumentering sjelden som en egen konsekvens av revurdering. I alle eksempler som har blitt brukt som underlag i denne rapporten blir dammens eksisterende instrumentering oppgradert som følge av ombygging av dammen.

I hovedsak er dette deformasjons- og lekkasjemålinger for fyllingsdammer, samt lekkasjemåling for betongdammer. Selv om NVE legger opp til en variert praksis i retningslinjene, er dagens arbeide med målemetoder i Norge dominert av et fåtall metoder.

2.3.1 Deformasjonsmålinger

For fyllingsdammer blir deformasjonsmålinger etter dagens praksis utført med deformasjonsbolter montert direkte i damskråningen, målesøyler og kronebolter i kummer. Dette gir en oversikt over hovedtrekkene i hvordan dammen og tetningskjernen oppfører seg.



Figur 2 Prinsippkisse for deformasjon- og setningsmåling ved fyllingsdammer (NVE, 2005).

Etter dagens retningslinjer skal deformasjon måles hvert 5. år, eller hver 7. for dammer av klasse 1. Hovedkostnaden for setningsmålinger blir dermed investeringen i antall bolter som settes, noe som kan være et større antall for de største dammene da det skal være et bånd bolter for hver 5. høydemeter.



Figur 3 Eksempel på skråningsbolt i nedstrøms damskråning.

Boltene måles inn manuelt med nivellement, men det forekommer også målinger med totalstasjon, noe som kan gi problemer med nøyaktighet, se Tabell 6. Metodikken er sårbar for systemfeil som varierende kompetansenivå hos landmålere, feilmonterte bolter (i små stener), bruk av skiftende høydesystem.

En annen diskusjon er om den anbefalte frekvensen og romlige oppløsningen av målingene er tilstrekkelig til å overvåke dammenes feilmekanismer.

2.3.2 Lekkasjemåling

Lekkasjemåling er bygd opp med ledemurer og overløp med instrumentering. For lengre dammer som (delvis) ligger fundamentert på løsmasser kan kostnaden for etablering av et slikt system bli betydelig som dokumentert i kapittel **Feil! Fant ikke referanseilden..** For disse større anleggene legges størstedelen av kostnaden på å samle lekkasjevannet gjennom å bygge ledemurer og samlebaseng.



Figur 4 Lekkasjemålesystemet kan bli komplekst og omfattende. Fra venstre eksempler fra Skjerka og Tunsbergdalsdammen.

Et problem med lekkasjemålesystemene som installeres er at lekkasjevannet ikke alltid går inn i lekkasjesystemet. Det finnes eksempel på lekkasjer i svakhetssoner og via karstfenomen, noe som kan være vanskelig å få oversikt over med denne typen instrumentering.

For fyllingsdammer og betongdammer fundamentert på løsmasser er det krav om kontinuerlig overvåkning eller måling. Målekummene bygges ofte inn i lekkasjehus og er vanligvis instrumentert med systemer for avlesning av vannstand gjennom flottør, ultrasonisk sensor eller trykkcelle.

I spesielle tilfeller installeres turbidimeter eller kamera for å overvåke innhold av finstoff i lekkasjevannet.

For lekkasjemålingene er det viktig å korrelere disse mot nedbør på dam/restfelt, snø- og ismelting og vannstand i magasinet. Dette kan gjøres med supplerende instrumentering eller statistisk. Her er det ytterst varierende praksis med rom for forbedring.

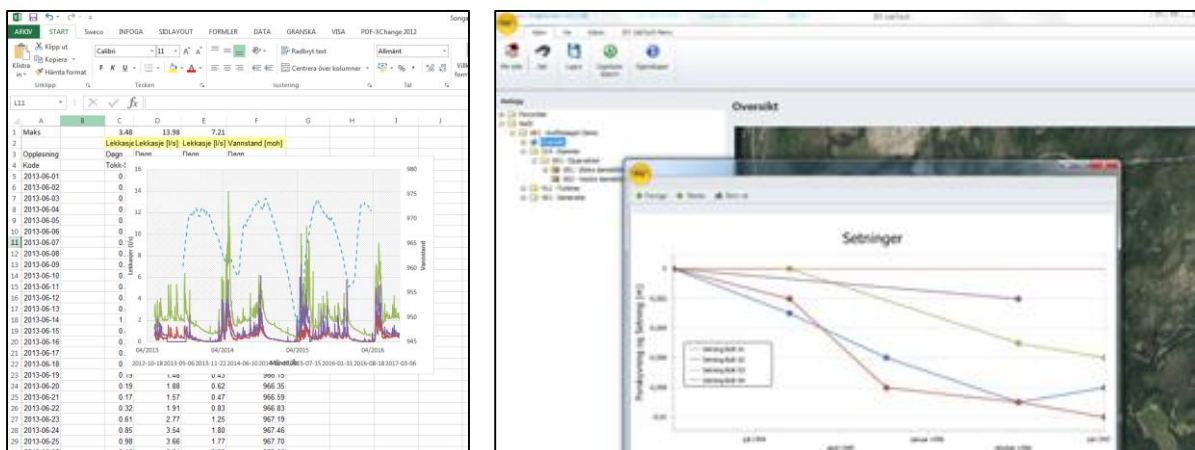
2.3.3 Databearbeiding

Etterbehandling av data innsamlet fra instrumenteringen er noe av det viktigste arbeidet som utføres. Data skal kvalitetssikres og lagres, noe som er etablert praksis innen hydrologiske data som NVE samler inn.

For data fra dammene er det i dag dameier som har ansvar for dette, noe som åpner for ulik praksis. Det er i dag to hovedsystem for arkivering og bearbeiding av damsikkerhetsdata;

1. Manuelle system, bl.a. i Excel
2. Måledata for dammer i JobTech

I flertallet av eksemplene vi har sett på er manuelle system benyttet. Disse systemene er meget fleksible og kan gi brukeren vesentlig informasjon, men kan samtidig ha problemer med kvalitetskontroll og er sårbare for bortfall i kompetanse eller brukerfeil.



Figur 5 To eksempler på bearbeidelse av data. Fra venstre et skjermbilde på lekkasjemålingsdata i Excel og måledata for dammer som viser setningsdata.

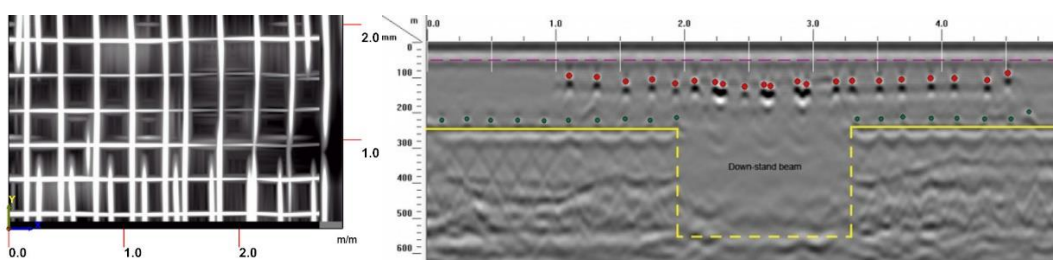
Måledata for dammer er mer komplekst og sikrer data gjennom en fastlagt prosedyre for innlasting av data som bidrar til kvalitetssikring og dermed bedre kontroll. Tilbakemeldinger fra brukerne indikerer at programmet ikke er brukervennlig og oppfattes som kostbart og ressurskrevende.

Alternativ finnes nå tilgjengelig internasjonalt, der et bredt spekter av databaser og analyseprogrammer finnes til lavere kostnad, se 5 Bearbeidning av data for et utvalg. Statkraft AB benytter f.eks. Intellidam til sine anlegg i Sverige.

2.3.4 Andre målinger

I tillegg til vanlig instrumentering kan en del ikke-destruktive målemetoder bidra til dampsikkerhetsarbeidet. Dette kan være metoder som kartlegger dammenes oppbygning ved å bruke lav-energi stråling. Dette kan være radarbølger, som f.eks markradar (Ground Penetrativ Radar - GPR), ultralyd, strøm, magnetfelt etc.

Markradar kan benyttes til å dokumentere armering der armeringstegninger ikke finnes, samt oppdatere som bygget tegninger eller demonstrere overdekning og skader i betongen.



Figur 6 Eksempel på bruk av markradar for å kartlegge armering (Sandberg GPR)

Elektrisk tomografi kan benyttes for å kartlegge varierende tetthet i en dam. Under programmet Stabledams som Norut begynte arbeide med i 2015, har elektrisk tomografi blitt benyttet for å kartlegge fjellbolter på Iptodammen. Her er boltene lokalisert, meislet ut og prøvetrukket for å dokumentere oppbygning.



Figur 7 Geoelektrisk tomografi på Iptodammen, forsøk 2015-2016.

Andre eksempler på tomografi er kartlegging av hulrom, degradering av betong, sprekkdannelser etc. Her benyttes oftest akustisk tomografi (AT) eller seismisk tomografi.

Spektralanalyse av overflatebølger (Spectral analysis of surface waves -SASW) er et ytterligere eksempel på teknikker som kan brukes på betong.

De overnevnte metodene er eksempel på ikke-destruktive undersøkelser som kan benyttes for å dokumentere stabiliteten til betongdammer og dermed unngå unødig ombygning.

2.3.5 Dispensasjon

Det er i dag praksis å be om dispensasjon fra NVEs retningslinjer der det av ulike anledninger ikke er nødvendig eller mulig å instrumentere. Utvalget av teknikker og synkende kostnader burde i prinsippet redusere behovet for dispensasjon. Eksempler der NVE har gitt dispensasjon tidligere er;

Lekkasjemålinger for betongdammer på fjell. Her får man etter søknad som regel dispensasjon fra regelverk dersom det er rent fjell nedstrøms dammen. Der det er mulig å rense fjellet nedstrøms dammen gjøres dette om kostnaden er sammenlignbar med installasjon av lekkasjemålingsarrangement.

Krav om kontinuerlig overvåkning av vannstand på vannverksdammer i høyere konsekvensklasse. Her er ikke den økonomiske motivasjonen for eier til å overvåke nødvendigvis den samme som for kraftverksdammer og det søkes ofte om unntak.

3 Kostnader

Instrumenteringskostnader kan deles opp i følgende tre komponenter;

- i. installasjon av instrumentering,
- ii. oppfølging og innsamling og
- iii. databearbeiding.

Instrumenteringen i Norge er fokusert på et fåtall metoder, og kommer som innledningsvis nevnt oftest sammen med andre tiltak. For fyllingsdammer er dette f.eks kronehøyning eller etablering av nedstrøms erosjonsvern. For betongdammer er det oftest lekkasjemålinger som må suppleres.

Installasjon av andre instrumenter, som f.eks. temperaturmålinger forekommer også, men her er data sparsomme.

3.1 Installasjon

For å danne et kostnadsbilde av hva instrumenteringen i Norge representerer er det samlet inn statistikk fra damanlegg som er rustet opp de siste årene. Data fra 14 dammer viser at 13 dammer har bygget om lekkasjemålingarrangementet, mens 8 har fått nye deformasjonsbolter. Av de 14 er 4 betongdammer og 10 stenfyllingsdammer, og man kan se at lekkasjemålingene i særstilling er kostnadsdrivende.

Tabell 4 Data samlet inn fra nylig utførte anlegg i Norge (kilder: Norconsult, Sweco). Kostnader for deformasjonsmålinger inkluderer kostnader for setning og målesøyler. Tall i tusen NOK.

Damtype	Lekkasje	Deformasjon
Gravitasjonsdam	110	
Fyllingsdam	60	20
Massivdam	160	
Platedam	110	
Lamelldam	45	
Fyllingsdam	230	6
Fyllingsdam	960	
Fyllingsdam	6 700	255
Fyllingsdam	14 200	315
Fyllingsdam	20 000	460
Fyllingsdam		240
Fyllingsdam	3 160	245
Fyllingsdam	1 445	500
Fyllingsdam	220	

Kostnadene relatert til etablering av instrumentering kan variere betraktelig, men i statistikken kan vi se at disse ligger over 2% for flere anlegg. Damtype, fundamentforhold, damhøyde, dammens oppbygning, og spesifikke krav kan gi stor variasjon i både omfang og enhetspriser.

Tabellen under viser typiske kostnadsnivå av etablering av instrumentering for de ulike parameterne i damsikkerhetsforskriften. Tabellen skiller mellom fyllingsdammer og betongdammer, og viser også merkostnadene ved etablering av instrumentering på eksisterende dammer. Deformasjonsmålinger i

betongdammer er ytre målinger, integrerte system har høy kostnad ved installasjon i eksisterende dammer.

Tabell 5. Kostnadsnivå for etablering av instrumentering. Kostnadsnivå markert med rødt for høyt kostnadsnivå, gult for middels og ingen farge for lave kostnader.

	Fyllingsdam		Betongdam		Variasjon
	Ny	Eksisterende	Ny	Eksisterende	
Lekkasje	Høy	Høy	Middels	Middels	Stor
Poretrykk	Liten	Middels	Liten	Middels	Middels
Deformasjon	Middels	Middels	Liten	Liten	Liten
Setning	Middels	Høy	Liten	Liten	Liten
Vannstand	Liten	Liten	Liten	Liten	Liten

3.2 Drift og databehandling

Oppfølging og datainnsamling gjøres ofte av eget personell, noe som gjør det vanskelig å få en total kostnad. Her er det et vesentlig skille på data som benyttes direkte i drift og som må rapporteres til NVE og damsikkerhetsdata. For førstnevnte, som blant annet inkluderer vannstandsmålinger i magasinet, tilhører dette ofte drift av kraftstasjonen noe som krever en annen datastruktur. Data samles inn kontinuerlig og bearbeides.

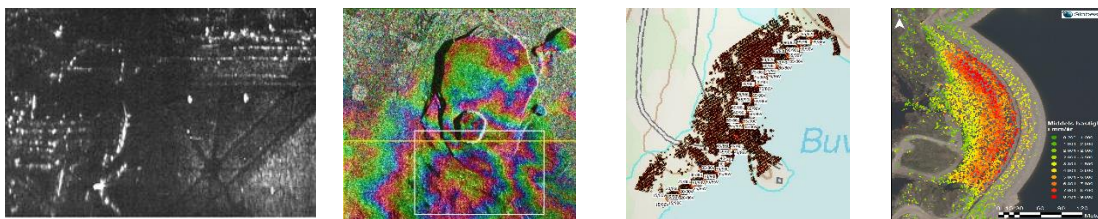
For damsikkerhetsdata er bruken oftest ikke direkte. Innsamlingen av data kan være automatisk eller settes bort til landmålingsfirma. Kostnadene er ofte begrenset da kun kostnaden med direkte datainnsamling regnes med. VTA legger oftest inn måledata inn i systemene de har, med fortløpende kvalitetssikring uten ytterligere budsjett.

4 Instrumentering

Selv om det er mye som kan måles, fokuserer denne rapporten på lekkasje- og deformasjonsmålinger da dette er mest relevant for dambransjen i dag. Innen dette området finnes det både i Norge og internasjonalt flere målemetoder og instrumenter som benyttes i dag basert på hver enkelt anleggs behov.

I tillegg til de etablerte metodene, finnes det også en del nye metoder, spesielt innen optisk oppmåling og anvendt geofysikk, som er nisjerettet. I dette kapitlet deles metodene inn i tradisjonelle, nyere og nisjerettede alt etter hvor kjente og anvendte de er.

Det er en hurtig utvikling i store deler av instrumenteringsmarkedet for landmåling grunnet utvikling av avanserte post-prosesseringsmetoder og stadig billigere hardware. Eksempler på dette er at militær teknologi som satellitter, laser og sonarer kan utnyttes til å registrere bevegelser, medisinsk teknologi fra elektro/resistivitetstomografi kan brukes til å se lekkasjer etc. Denne utviklingen kommer til å fortsette i årene fremover, med en todelt utvikling.



Figur 8 Utvikling av InSAR. Fra venstre, første SAR-bilde 1957, SeaSat første InSAR 1980-tall, kommersielle høyoppløste SAR satellitter 2000-tallet og Sentinel -gratis satellittdata fra ESA fra 2015.

Først og fremst kommer stadig mer avansert utstyr til å bli mer tilgjengelig for den enkelte dameier der droner og portable måleinstrumenter kan gi stadig mer nøyaktige målinger. Dette gjelder også plattformer for instrument i form av fjernstyrte semi-autonome farkoster i luft og i og under vann.

Den andre utviklingen vil være innenfor fjernovervåkning der satellitter i stadig større grad kan erstatte feltforsøk og fastmontert utstyr.

Metodene beskrives i korthet og angis en nøyaktighet, som her er instrumentnøyaktigheten, og ikke andre feilkilder som kan gi større verdier. Hver metode er også knyttet opp med en kostnad for å instrumentere en mellomstor dam på 25 meters høyde. Kostnadene inkluderer bearbeidelse av data til et produkt som er klart for bruk i damsikkerhetsøyemed.

4.1 Deformasjonsmålinger

Deformasjonsmåling utføres for å dokumentere stabilitet og overvåke dammens integritet. Måledata skal kunne benyttes til å varsle om behov for tiltak og hyppighet og oppløsning må tilpasses deretter. Metodene kan deles inn i dagens tradisjonelle målemetodikk med landmåling, nyere etablerte teknikker, samt mer spesielle målemetoder som kan være av interesse ved spesielle tilfeller. Om man generaliserer kan man si at de tradisjonelle metodene gir data for enkeltpunkt, mens de nyere optiske/radarbaserte metodene gir hele overflater. De mer nisjerettede metodene kan være interessante ved spesielle behov som en følge av feilmodeanalyse eller avvikende bevegelsesmønstre.

Disse tre gruppene kan dermed deles inn som følger;

1. Tradisjonelle målemetoder
 - a. Nivellement/totalstasjon/GPS
2. Nyere, etablerte teknikker
 - a. Laserskanning
 - b. Fotogrammetri
 - c. InSAR
3. Spesielle målemetoder
 - a. Ekstensometer
 - b. Inklinometer
 - c. Trykceller/Hydraulikk
 - d. Optisk fiber

I tillegg finnes det tre metoder for å kartlegge deformasjoner i på oppstrøms side

2. Nyere, etablerte teknikker
 - a. Sonar
 - b. ADCP
 - c. Laserskanning (grønnlaser)

Målemetodene har forskjellig nøyaktighet, form, oppdateringsfrekvens, punkttetthet og kostnad. I tabellene under angis instrumentnøyaktigheten i mm, typisk punkttetthet og form på målingene.

Tabell 6 Målemetoder for deformasjonsmålinger i dagen (Oppdatert og tilpasset, fra Ekström, Lier 2013). Metodens måleform: punkt (P), overflate (O) eller linje (L). * kostnader er i konstant utvikling og kan variere vesentlig.

Metode	Nøyaktighet (mm)	Form	Punkttetthet (m ²)	Kostnad* (installasjon / per måling)	
Deformasjonsmåling med nivellement	± 0,2 – 0,4 mm	P	600 - 700	1 000 000	100 000
Deformasjonsmåling med totalstation	± 7 mm	P	600 - 700	1 000 000	100 000
Automatisk deformasjonsmåling	± 7 mm	P	600 - 700	1 500 000	20 000
Laser – landbasert / terrestriell (TLS)	± 2 - 10 mm	O	< 1	150 000	40 000
Laser – luftbåren	± 10 - 20 mm	O	< 1	150 000	150 000
Fotogrammetri - luftbåren	± 10 - 20 mm	O	< 1	90 000	90 000
InSAR	± 0,5-1 mm	O	0,25 - 100	29 000-600 000	29 000-100 000
GBInSAR (Landbasert)	± 0,4 mm	O	< 1 m	~150 000	600 000
GNSS	± 3 mm	P	600 - 700	1 000 000	200 000
Extensometer	± 0,1 mm	L	Måler bevegelse i installert linje.	2 000 000	350 000
Inklinometer	± 0,2 mm	L	Måler bevegelse i installert linje.	2 000 000	350 000
Trykkcelle/Hydraulisk	± 0,25 % av damhøyde	L	Vertikalt i installert punkt	1 000 000	200 000
Optisk fiber	< ± 1 mm	L	Bare bevegelse i fiberen	n/a	

Tabell 7 Målemetoder for deformasjonsmålinger på vannsiden.

Metode	Nøyaktighet (mm)	Form	Punkttetthet (m ²)	Kostnad* (installation / per måling)	
Multibeam sonar	± 10 mm	O	< 1	100 000	100 000
Laser – luftbåren	± 10 - 20 mm	O	< 1	150 000	150 000
ADCP	1% av dyp	O	< 1	100 000	100 000

4.1.1 Tradisjonelle målemetoder

Tradisjonelle målemetoder måler høydene på målebolter, og er dermed direkte avhengig av kvaliteten på disse. Målebolter som er satt feil, har for dårlig kvalitet eller monteres i små stener kan gi avvik.

4.1.1.1 Nivellement

Dette er den klassiske innmålingsmetoden som er meget nøyaktig, basert på at man utgår fra en kjent høyde. Avvik tenderer til å akkumuleres over avstand og det er viktig å foreta flere målinger med kalibrert utstyr der en går tilbake og utjevner eventuelle feil. Delsikt bør holdes under 30 meter for å unngå refraksjonsfeil, og kjentmerkene bør ligge nær da en typisk får akkumulert feil på 1-3 mm per kilometer målt.

4.1.1.2 Totalstasjon

Totalstasjoner er en arbeidsbesparende innmålingsmetode i forhold til nivellement. Målefeil avhenger av avstand og vinkler, noe som nødvendiggjør at man har et antall fastmerker som man kan relatere målingene til. Den største arbeidsbesparelsen er at man kan måle direkte mot målepunktene uten å måtte dele opp i etapper som for nivellement.

Automatisk deformasjonsmåling: Ved å montere opp en totalstasjon og faste prismer kan man få målinger med ønsket intervall.

4.1.1.3 GNSS

Det globale navigasjonssystemet GNSS er samlingen av posisjoneringssatellittene GPS-NAVSTAR, GLONASS og etter hvert GALILEO og BEIDU som samlet kan gi en nøyaktig posisjonering. I dag gir ikke metoden tilstrekkelig nøyaktighet ved tradisjonell innmåling, mens den for måling i faste punkt over tid kan gi høy nøyaktighet. Faktorer som driver dette er etableringen av kontinuerlige referansestasjoner (CORS) og antall tilgjengelige satellitter. Nøyaktigheten som er oppgitt anser statisk måling, ved standard realtidsmåling med basestasjon (RTK-Real Time Kinetic) øker feilkilden til +/- 10 mm.

4.1.2 Nyere teknikker

De nyere teknikkene kan registrere hele dammens overflate med meget høy oppløsning. Teknikkene forstyrres av vegetasjon og krever dermed at damkroppen er fri for busker og kratt.

4.1.2.1 Laserskanning

Laser kan gi målepunkter med kvadratcentimeters oppløsning. Metoden krever ingen fastpunkter i måleområdet, selv om dette kan øke nøyaktigheten noe. Fastmerker er nødvendig for å gi målingene rett høyde og posisjon, men man kan også gi relativ bevegelse i forhold til grunnfjell om dette ligger i dagen.

Laserskanning fra faste målepunkt, kjent som landbasert eller terrestrisk skanning gir data for hele dammen med stor nøyaktighet. For strekninger lengre enn 100 meter øker usikkerheten noe.

Laser kan også benyttes fra helikopter og droner (ubemannede luftfarkoster -UAS), noe som gir noe lavere nøyaktighet enn den terrestriske da den relative posisjonen må bestemmes til enhver tid.

Metoden kan også registrere farger på punkt, som gjør at man enkelt kan bygge opp virkelighetstro 3D-modeller som ligner de man får fra fotogrammetri.

Laser som anvender blå/grønt lysspekter kan også benyttes til å foreta målinger under vann. Selv om tidlige forsøk utført i Sverige (Erixon, 2014) har gitt begrensede resultat for elver og magasin grunnet partikler og humus, har metoden senere blitt benyttet av bl.a. Statkraft med gode resultat på større

dyp. Metoden er ennå ikke utprøvd på dammer, men bør i teorien kunne fungere godt på dammer med lite partikler og humus i reservoaret.

Tabell 8 Lasersystem for undervannsmåling (Stickler, 2016). Secchi refererer til siktedyp, se forklaring under.

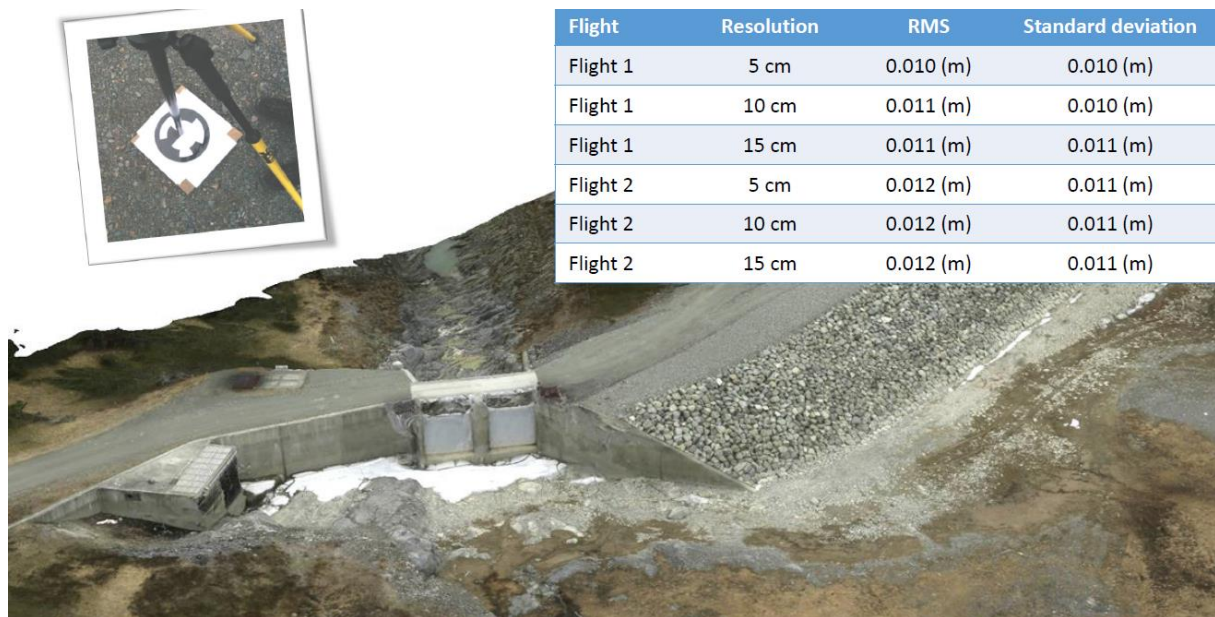
System	λ [nm]	Max depth [m]	Max PRF [kHz]	Beam divergence [mrad]	Flying altitude [m]	Point density [pts/m ²]	System weight [kg]
Aquarius	532	12	70	1	300-600	0.2-5	83
CATS	532		8	2	500-1000		40
Leica Chiroptera	Topo:1064 Bathy:532	1.5 Secchi	500 35	0.5 3	1600 400-600	12 1.5	80
EEARL	532	25	10	0.5	300		114
Leica HawkEye III	T:1064 B:532	50	T: 500 D: 10 S: 35	2-12	1600 400-600	T: 12 D: 0.4 S: 1.5	170
LADS Mk3	532	2.5 Secchi	1.5		365-900		132
RIEGL VQ-880 G	532	1.5 Secchi	550	0.7-2	600	20	60
SHOALS 3000	T:1064 B:532	60	20 3	5	300-400		217
Optech Titan	T:1550 / 1064 B:532	1.5 Secchi	300	T: 0.35 B: 0.7	300- 2000 300-600	T: > 45 B: > 15	116

En katalogisering av ulike grønne lasere viser at utviklingen ikke har stoppet opp. 2017 slippes en ny modell som skal kunne måle ned til et dyp på 80 meter.

Flere produsenter relaterer dyp til Secchi-dyp, som er siktedypet man måler med å senke en Secchi-disk ned i vann. Tradisjonelt er dette en hvit plastskive med en diameter på 30 cm på enden av en stang. Eutrofiering, sedimenter og humus kan begrense Secchidypet til under 1 meter, mens det i næringfattige, oligotrofe, innsjøer kan være siktedyp på over 15 meter.

4.1.2.2 Fotogrammetri

Fotogrammetri i dag benytter seg av høyoppløselige kameraer, GNSS, tung dataprosessering og droner som gjør at man kan kartlegge dam og omkringliggende terreng. Nøyaktigheten blir lik luftbåren laser der det blir relativ posisjonering som er begrensende.

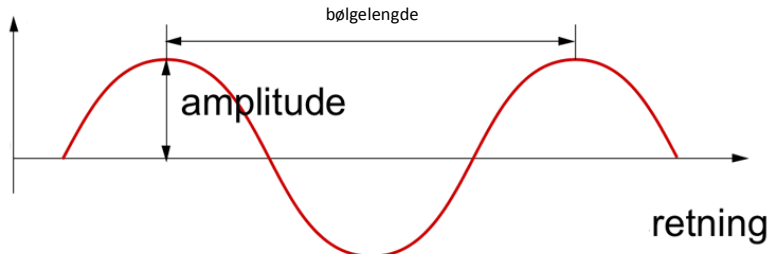


Figur 9 Utsnitt fra 3D-modell for Flåsjödammen i Sverige. Høydenøyaktigheten –RMS (Root Mean Square) er på 11-12 mm. Oppløsning 5 x 5 cm. Kilde: Spotscale.com

Metoden fungerer gjennom å optisk spore fastmerker som man har kjente koordinat på og relatere disse til bildene man tar basert på vinkel. Bildegjenkjenning kan identifisere punkt i hvert bilde og sy disse sammen til en bildesky koblet sammen i hvert felles punkt. Under målingen tas flere sett med bilder som dermed gir god mulighet for overbestemmelse av hvert punkt. Høydemodellen som skapes digitalt blir dermed meget nøyaktig.

4.1.2.3 Fjernmåling -Satellitmåling

Syntetisk Aperture Radar (SAR) er et instrument som vanligvis er installert på jordobservasjons-satellitter som går i polare baner, 5-800 km over jordoverflaten. Ved å benytte interferometri (InSAR) kan nøyaktigheten til satellittene forbedres til å angi bevegelse (avstand til satellitten) ned til millimeters nøyaktighet over store områder.

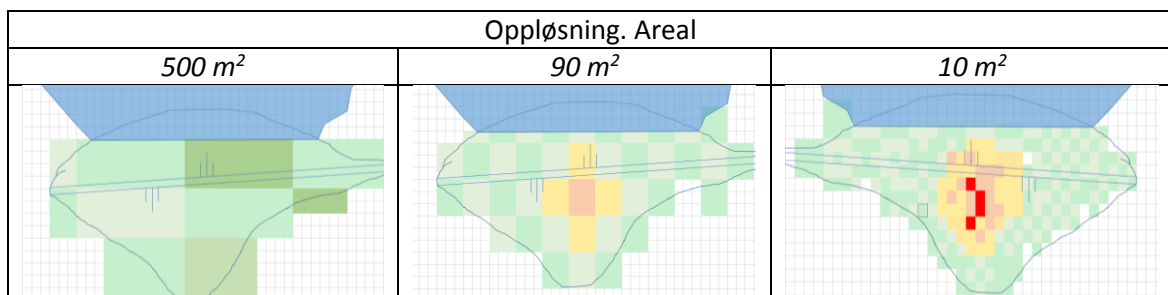


Figur 10 Nøyaktigheten til InSAR begrenses ikke av avstand eller oppløsning på radarbildene, men av hvor stor andel av bølglengden som kan måles.

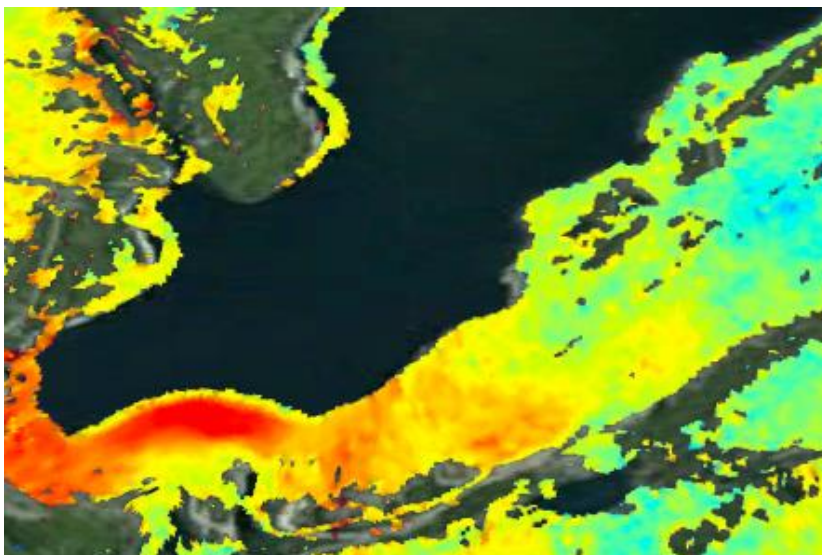
Ved å kombinere to satellittbaner (ascending og descending) kan man i tillegg til vertikal bevegelse, også få en indikasjon på bevegelse horisontalt.

InSAR har kommet inn i damsikkerhetsindustrien etter en tidlig studie (Ekström og Lier, 2013), etterfulgt av en pilot avsluttet i 2015 (Lier et al, 2015). I pilotstudien ble det i Norge mellom 2013-2014 gjennomført forsøk med kartlegging av setninger av fire dammer i Norge. Konklusjonen var at InSAR-målingene som ble gjennomført var mer nøyaktige enn de tradisjonelle målemetodene. Teknikken fungerer best på hardt og tørt underlag og begrenses av vegetasjon, snø og vann.

Forsøkene viste videre at målepunkttettheten økte betraktelig både i rom og tid. Ved å øke oppløsningen på datamengden fra et målepunkt per 500 m² damoverflate til et per 9-20 m² kan man lokalisere begynnende deformasjoner lokalt, som f.eks. synkehull. Ved å ha flere punkt i tid kan man også overvåke utviklingen av eventuelle deformasjoner, om setningene akselererer eller forblir konstante.



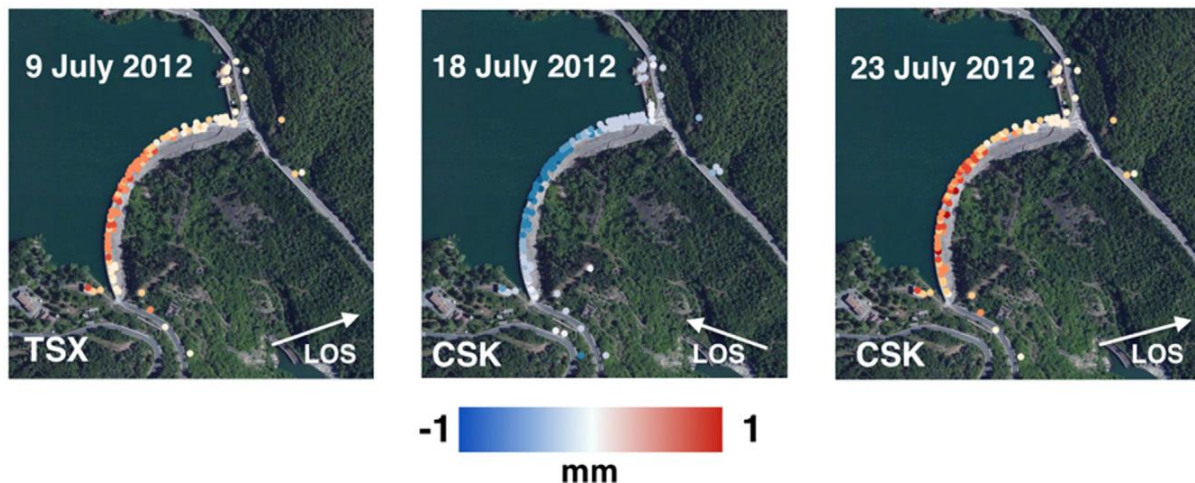
Figur 11 Betydningen av oppløsning på datasett ved lokalisering av synkehull.



Figur 12 Resultater for Akersvassdammen, med bevegelser i rødt på opp imot 10 mm/år. Merk at analysen dekker områder rundt dammen i tillegg til damkroppen. (kilde:globesar.com)

I dag finnes det via ESAs (European Space Agency) Sentinel-program gratis InSAR-data for hele Norge og analysekostnadene er nede på en brøkdel av tidligere. Dette gjør at metoden er høyst konkurransedyktig i forhold til tradisjonell innmåling og er allerede i dag i bruk på en håndfull fyllingsdammer spredd over hele landet.

Amerikanske, italienske og tyske forskere i 2016 benyttet InSAR til å analysere betongdammer (Milillo, 2016). I tillegg har metoden begynt å få feste i Nederland og USA og det er ventet ytterligere utvikling innen fagfeltet.

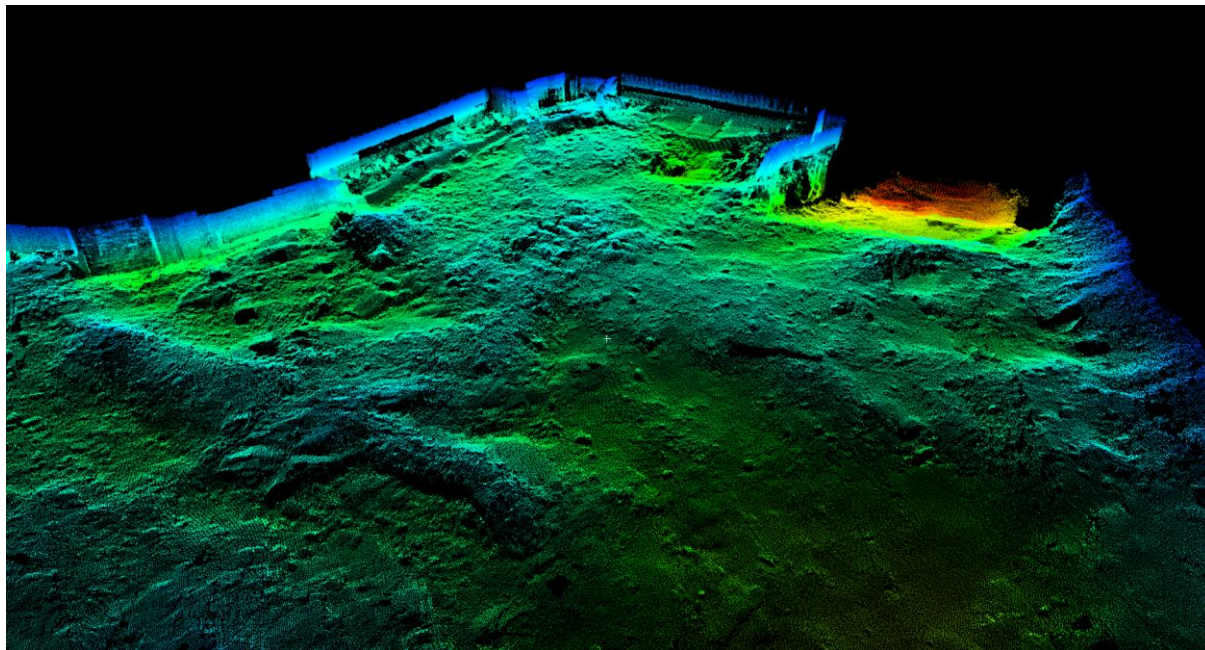


Figur 13 Resultater av InSAR analyse fra Pertusillo dammen i Basilicata, Italia. Analysen viser elastiske sub-mm bevegelser i damkroppen

Av spesiell interesse er det at resultat kan hentes direkte inn i analyseverktøy med mulighet for fortløpende oppdatering så lenge dammen er snøfri. En ytterligere finesse er at det er mulig å etablere dataserier bakover i tid om det finnes satellittdata, i ekstreme tilfeller kan det finnes målinger tilbake til 90-tallet.

4.1.2.4 Multi-stråle Sonar

Multi-stråle sonar sender ut flere pulser som reflekteres tilbake. De senere årene har størrelsen og prisbildet på sonarer gått kraftig ned, mens nøyaktigheten har økt med bedre instrument og postprosessering.



Figur 14 Eksempel på skanning av kraftverksmagasin. Her er en Reson SeaBat 8125 benyttet, med 240 stråler fordelt over 120°. Denne sonaren går til 120 meters dyp.

Selv om nøyaktighet på en sonar er nede i noen få mm, må resultatene knyttes til høydesystemet via gyro og GPS. Dette gjør at nøyaktigheten på frittstående utstyr er rundt 10 cm. Om lenker opp målingen med sporing fra land via laser eller totalstasjon kan nøyaktigheten bedres til 30-40 mm som best. Dette er tilstrekkelig til å kunne identifisere begynnende synkehull og ras i oppstrøms erosjonssikring.

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) har lignende egenskaper som multi-stråle sonar, men vil ikke nå samme dyp og ha samme nøyaktighet.

4.1.3 Spesielle målemetoder

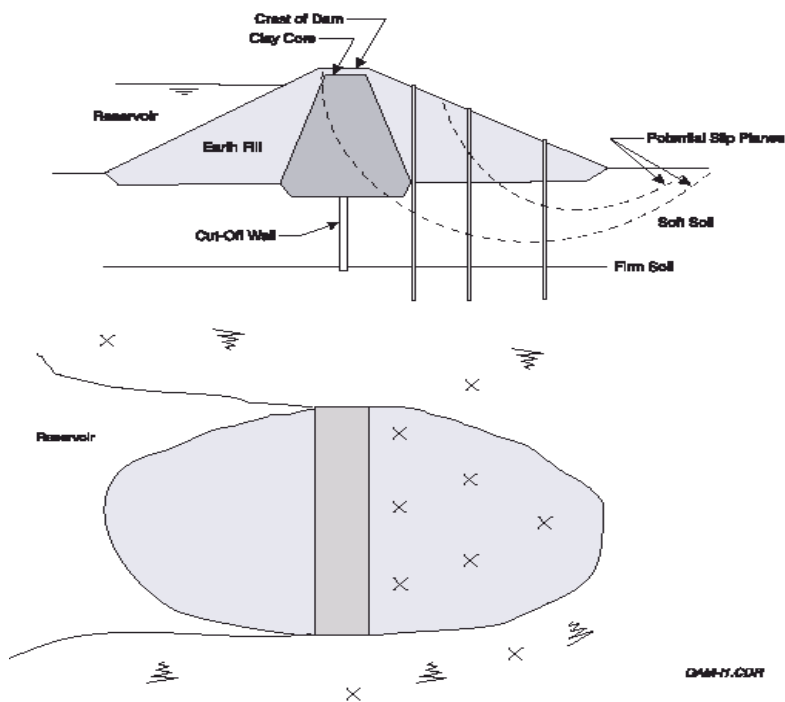
Andre, mer spesielle målemetoder krever forberedelse og må bygges inn i dammen. Felles for de spesielle målemetodene er at de oftest er aktuelle der kontinuerlige målinger er nødvendige eller der feilmodi gjør at data må samles inn fra eller under dammen med jevne intervall. Alle instrumentene kan måles manuelt eller digitaliseres for logging og kontinuerlig overvåkning. For prisene er det regnet med at det installeres 5 rør med 10 punkt hvert rør, 5 års livslengde.

4.1.3.1 Ekstensometer

Ekstensometer er en vel etablert instrumentering for å angi bevegelse i en gitt retning. Denne er spesielt anvendbar i fjell og fundament som dammer og tunneler. Det er to hovedtyper, kontakt- og ikke-kontakt ekstensometre. For kontakt ekstensometre er instrumentet i prinsippet en streng som ligger i et rør som er forankret i den ene enden og har et måleinstrument i den andre. Ikke-kontakt ekstensometer kan benytte laser eller optisk registrering for ytterligere nøyaktighet.

4.1.3.2 Inklinometer

Inklinometer registrerer helningen/vinkelen i forhold til vann- og loddrett. Moderne elektriske inklinometre, som først og fremst brukes til å overvåke glidesirkler i dammer og skråninger, har en nøyaktighet på mellom $\pm 0,01^\circ$ til $\pm 2^\circ$. En god installasjon har en nøyaktighet på under $\pm 0,05^\circ$.



Figur 15 Installasjon av inklinometer i en dam for å overvåke glidesirkler.

4.1.3.3 trykkceller og hydrauliske måleinstrument

Trykkceller og hydrauliske måleinstrument måler trykket i lukkede hydrauliske system. Endringer i det totale trykket fra jord og sten, vann og atmosfære måles direkte. Atmosfæriske variasjoner kan kalibreres bort via en sekundær måler. Systemene brukes sjelden i dammer, da de er dyre, sårbare og vanskelig å erstatte ved feil.

4.1.3.4 Fiberoptikk

Fiberoptiske kabler benyttes i dag innen flere fagfelt og har funnet sin plass innen infrastrukturovervåkning der den kan brukes til å overvåke bevegelser og deformasjon av betong bl.a. Internasjonalt anvendes fiberoptiske kabler innen setningsovervåkning, både på betong- og fyllingsdammer. Fiberoptikk er godt egnet til å overvåke bevegelse og deformasjon i realtid.

Det som er viktig å få med seg er at kablene graves eller støpes inn i dammen, slik at de følger dens bevegelser. I en fyllingsdam kan dermed kablene være utsatt for tele/tine-prosesser samt grunnvann. Det er også en klar begrensning i hvor mye deformasjon en fiberoptisk kabel kan ta før den brytes. Fiberoptiske kabler bør derfor ikke legges inn der det forventes store setninger da kablene kan brytes og dermed miste funksjon.

Fiberoptiske kabler kan måle deformasjoner på mm-nivå for hver løpemeter av kabelen som kan være titalls kilometer lang.

4.2 Lekkasjemåling

For lekkasjemåling kan man se på følgende fire målemetoder, inndelt etter tradisjonelle metoder, nyere teknikker og nisjeteknikker under utvikling.

1. Tradisjonelle metoder
 - a. Oppsamling med lekkasjemåling
 - b. Piezometer/vannstandsør
2. Nyere, etablerte teknikker
 - a. Temperaturmålinger fiber
3. Spesielle målemetoder
 - a. Resistivitetsmåling
 - b. Sporingforsøk

Tabell 9 Målemetoder for lekkasjemålinger. *Kostnader varierer vesentlig og er i konstant utvikling.

Metode	Lekkasje	Kostnad* (installasjon / per år)	
Oppsamling	Måles direkte	750 000 og oppover	50 000
Piezometer	Beregnes	1 000 000	50 000
Resistivitetsanalyse	Kun plassering	350 000 per	350 000 per
Selvpotensial	Beregnes	1 500 000	50 000
Fiber	Beregnes	2 000 000	100 000

Felles for alle metodene er at den forholder seg til lekkasjer som påvirkes av vannstand i magasinet, samt eksterne parametere som nedbør og temperatur. Målinger må tas kontinuerlig under varierende forhold for å bestemme hvilken påvirkning disse har. Det er viktig å etablere en lengre tidsserie, da dette gjør det mulig å utarbeide statistikk som kan benyttes til å sette grenseverdier og dermed avdekke unormalt høye lekkasjer. Data under ekstreme forhold er av spesiell interesse.

4.2.1 Tradisjonelle metoder

De tradisjonelle metodene måler vannet direkte, enten gjennom å samle vannet og måle det hydraulisk eller å bestemme hvor overflaten på vannstrømmingene gjennom dam og fundament går.

4.2.1.1 Oppsamling med lekkasjemåling

Av alle teknikkene er den tradisjonelle oppsamlingen av lekkasjer i et sentralt overløp den enkleste og sikreste metoden når den utføres korrekt og korreleres med observasjoner fra meteorologiske observasjoner. For mindre dammer med små sidetilsig er kostnadene for å etablere og drive systemet små. Resultatet blir ofte korrekt uten større analyser annet en korrelasjon mot vannstand i magasinet.

Som beskrevet i kapittel 2.3.2 blir dette komplisert for større dammer eller der en har tilsig fra omkringliggende terreng. Her behøver man å bygge store ledemurer, korrigerer lekkasjene for snøsmelting og nedbør. En meteorologisk stasjon ved dammen kan ofte være påkrevd.

Om dammene har andre komplikasjoner som f.eks. en mer komplisert fundamentering kan metoden være vanskelig, misvisende og/eller kostnadsdrivende. Eksempler på dette er der man har konstatert at det forekommer karstfenomen, lekkasjer gjennom svakhetssoner i fundament, sidedammer etc.

I dammer der en har tele kan metoden være misvisende da man på vinteren kan ha reduserte lekkasjer på grunn av isbygning i dammen. I noen få eksempler kan man mistenke at deler av dammen har permafrost, noe som kan påvirke lekkasjene året rundt. I disse tilfellene kan andre metoder være av interesse.

4.2.1.2 Piezometer og vannstandsør

Den vanligste metoden for dammer fundamentert på løsmasser er piezometer/vannstandsør. Her kan grunnvannsnivåene overvåkes –noe som gir en indikasjon om lekkasjeendringer i og under dammen. Gradientene i dammen kan benyttes til å estimere lekkasjer om permeabiliteten og oppbygningen er kjent.

Nivåmålingene kobles med temperaturmålinger for å beregne strømningshastighet og dermed angi lekkasjestørrelse. Dette fungerer ved at man ser på temperaturkurven i magasinet og målingene i piezometrene i dammen over tid. På grunn av de enorme volumene og varmekapasiteten til vann vil temperaturene være ut av fase i forhold til hverandre, noe som indikerer forflytningen gjennom damkroppen. Ved å se hvordan varmefronten forflytter seg kan man lese ut hastigheten på vannstrømmene gjennom dammens tetningskjerne.

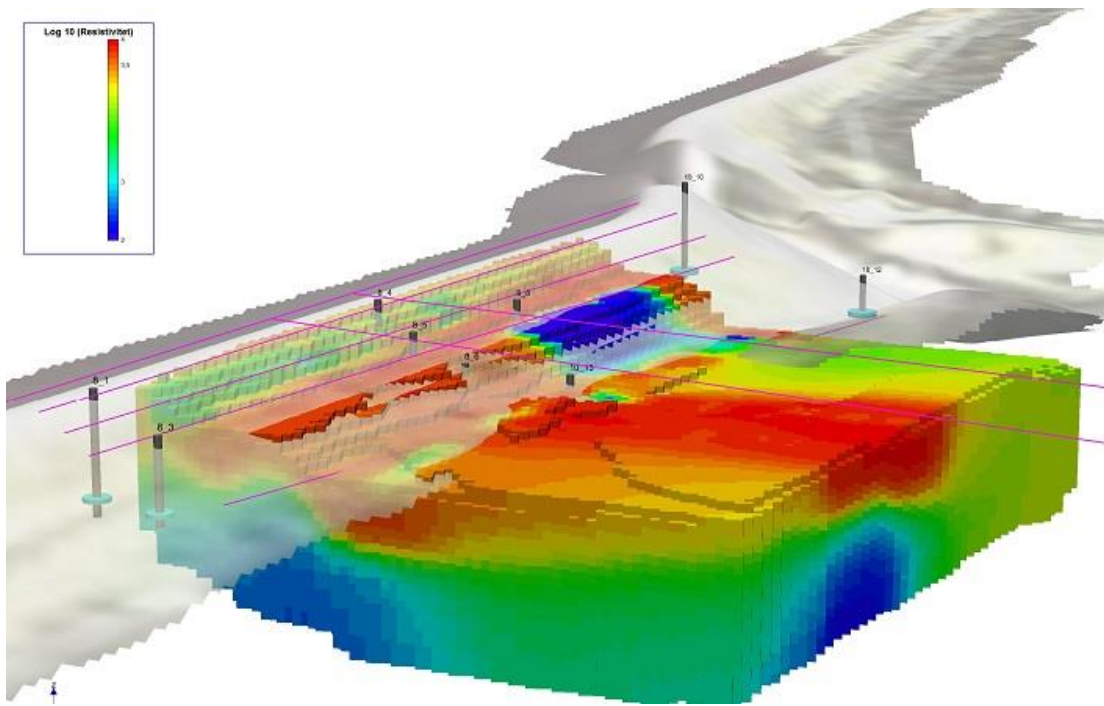
Sporingsforsøk kan anvendes for å etablere hvor lekkasjene oppstår eller hvor vannførende synkehull i oppstrøms damskråning leder, for eksempel ved mistanke om rørosjon. Sporingsforsøkene kan også benyttes til å verifisere tetting av lekkasjer ved injeksjon. Avhengig av formål, vannkjemi og tilgjengelige instrumenter kan radioaktive isotoper, fargestoffer eller salt benyttes.

4.2.2 Nyere teknikker

For lekkasjemåling er det etablert flere nyere teknikker. Felles for disse er at de ikke gir lekkasjene direkte slik at disse må ses relativt eller beregnes. Derimot kan målingene benyttes til å lokalisere lekkasjene i større grad.

4.2.2.1 Resistivitetsanalyse/tomografi

Resistivitetsanalyse er benyttet i en årrekke. I Sverige benyttes denne metoden av gruedammer der den gir dammens og fundamentets evne til å lede strøm. Lekkasje av forurenset vann påvirker ledeevnen betydelig og kan gi en indikasjon om svakheter i damkonstruksjon eller fundament.



Figur 16 Resistivitetsanalyse (kilde: <http://www.geovista.se>).

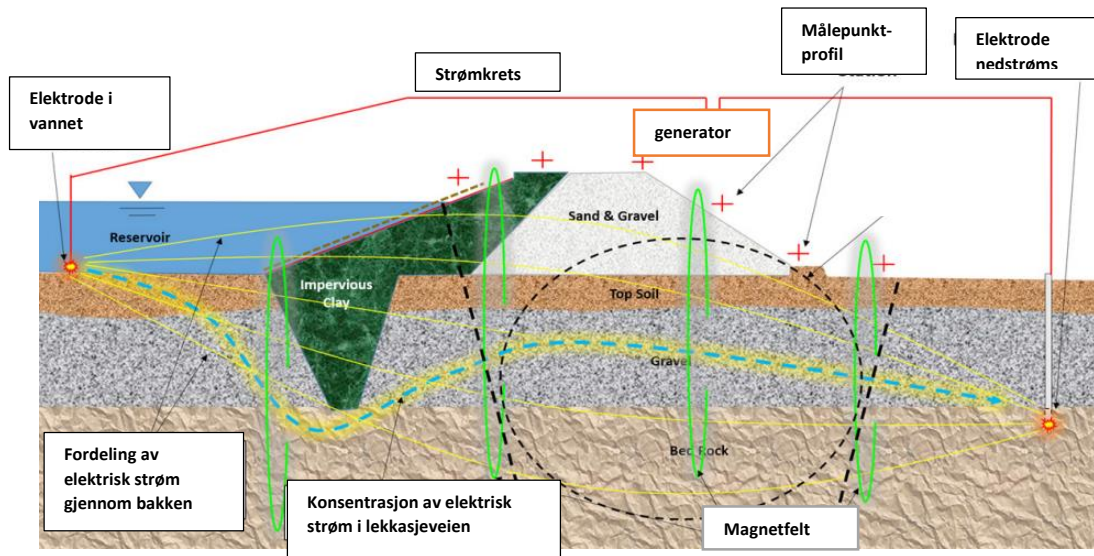
Det er i dag ingen dammer instrumentert med selvpotensial eller resistivitetsanalyse, men et forsøk rundt internerosjon i Røsvatn-forsøkene i 2005 konkluderte med at metodene virker i prinsipp (Elforsk, 2005).

4.2.2.2 Willowstick

Willowstick er en avart av resistivitetsanalyse og er en lovende målemetodikk som har vist seg være anvendbar i Norden. Metoden er utviklet i USA og har vært anvendt i en årrekke med stor suksess, og forsøk ved fem norske dammer i 2016 viser at metodikken er anvendbar for Nordiske forhold.

Teknikken bak målemetoden går ut på å lede vekselstrøm med en bestemt frekvens direkte gjennom lekkasjeveien. Dette i kontrast til resistivitetsmetoden som tradisjonelt induserer likestrøm mellom to elektroder på objektet der lekkasjen går igjennom

For Willowstick plasseres en elektrode i vannet, og en i den resulterende lekkasjen nedstrøms. Når deretter en spenning tilføres oppstår det en krets når strømmen tar korteste vei med minst motstand mellom elektrodene.

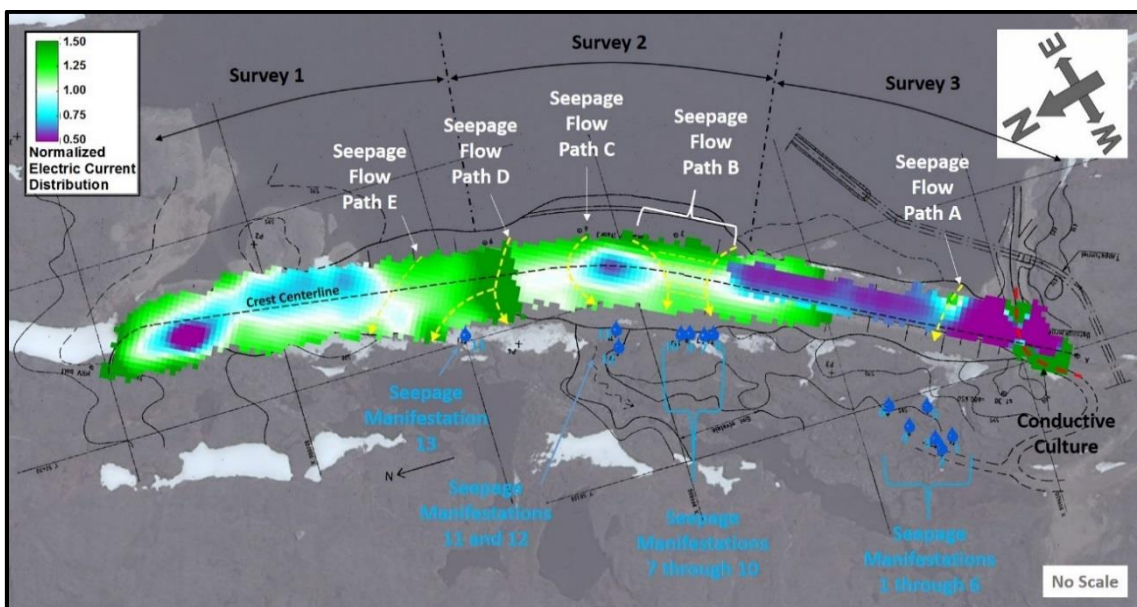


Figur 17 Prinsippkisse for Willowstick.

En ytterligere forskjell er at man med den nye metoden måler magnetfeltet og ikke det elektriske spenningsfeltet som ved resistivitetsmåling. Magnetfeltet som kan avleses er ytterligere identifiserbart ved at man kjører det med en individuell frekvens, slik at andre kilder kan isoleres bort fra analysen. Om det finnes ledende mellomliggende lag (som f.eks. leire), ledninger eller stålrør, kan disse også filtreres bort på lignende sett om de er kjent og innmålt.

Avvik i magnetfeltet kan på denne måten lokaliseres til ekstreme dyp, men da med kraftig nedsatt presisjon.

Selve feltet leses av med sensorer som er koblet sammen med en GPS for å presist kartlegge grunnvannsforhold og lekkasjeveier. Ved å flytte elektrodene opp- og nedstrøms kan man etablere overlappende undersøkelser som muliggjør fremstilling i 3D.



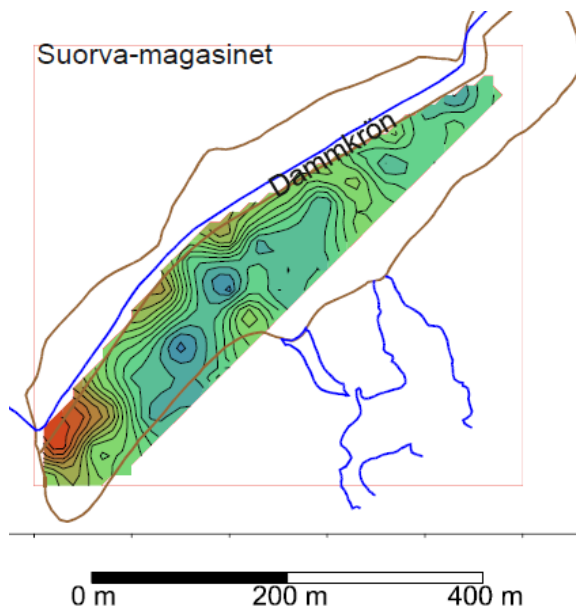
Figur 18 Eksempel på Elektrisk feltdistribusjon i en dam etter analyse. Grønt angir høy ledningsevne og lekkasje, mens lilla indikerer at dammen er tett.

For modelleringen benytter Willowstick seg av en modellering av magnetfeltet kalt elektrisk feltdistribusjon (Electric Current Distribution – ECD). Resultatene fra denne

magnetfeltmodelleringen kan deretter inverteres. Teknikken for invertering betegnes som Resistivity Mono-pole Profiling and Sounding, eller RaMPS™ – og er allerede etablert i geofysiske undersøkelser som en mer nøyaktig måleteknikk for å etablere geofysiske strukturer og deres plassering horisontalt og vertikalt.

4.2.2.3 Selvpotensial

Selvpotensial, som også er kjent som spontaneous potential (SP), måler naturlig forekommende spenningsforskjeller rundt elektroder.



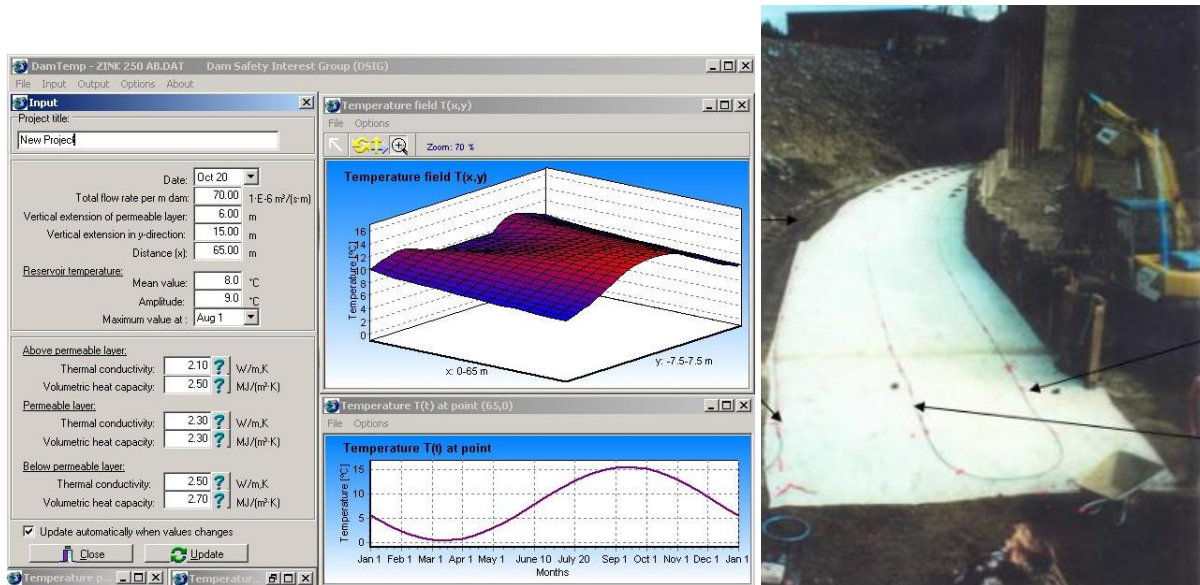
Figur 19 Forsøk med selvpotensial på Sourvadammen i Sverige 1993. Her indikerer målingen lekkasjer ved dammens venstre landfeste.

Elektrodene kan settes inn i borehull, eller måles fra overflaten, og kan dermed brukes som instrumentering av grunnvannsnivå. Om man setter et elektrodene i grid med c/c 50 m vil dette gi en god oversikt over vannstand og gradienter.

Metoden er demonstrert i et fullskalaforsøk så tidlig som 1993 og burde være attraktiv i dag med lavere kostnader for instrumentering og prosessering, samt lengre livstid på elektrodene. Moderne elektroder har garantert livstid på opptil 50 år. Nyere modelleringsverktøy og postprosessering vil bedre oppløsningen og dermed øke brukerverdien av resultatene vesentlig.

4.2.2.4 Temperaturmålinger i fiber

Temperaturmålinger med fiber kalles distribuert temperaturmåling, DTS (Distributed Temperature Sensing). Det finnes i dag 12 dammer i Sverige som er instrumentert med disse systemene. Systemet må installeres slik at det får kontakt med vannet som strømmer gjennom tetningskjernen. Dette gjør at fibrene må legges forholdsvis dypt, noe som innebærer store inngrep i dammene. Av denne årsaken er denne typen instrumentering er først og fremst aktuell ved nye fyllingsdammer.



Figur 20 Eksempel på temperaturmåling med en klassisk temeperaturvariasjon. For større dammer kan forskyvningen være betydelig i tid.

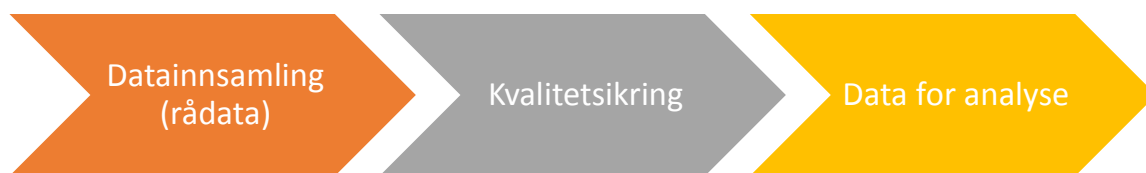
Systemet er komplisert å installere og krever en lang kalibreringsperiode. Etter innkjøringsperioden kan dataseriene tas ut av kompetent personale.

5 Bearbeiding av data

De måleseriene som instrumenteringen samler inn har begrenset nytte om dataseriene ikke samles, analyseres og lagres. Tradisjonelt har data vært av begrenset omfang, noe som har begrenset nødvendigheten av metoder for å bearbeide data. Dette er på vei til å endre seg med moderne dataoverføringssystemer og tilleggsinstrumentering.

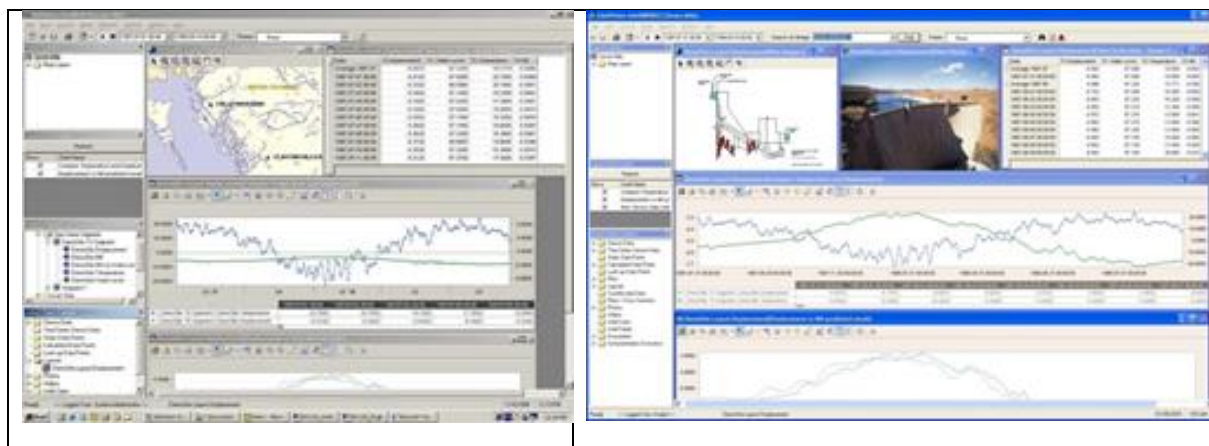
I tillegg til realtidsdata vil det ofte være interessant å samle data fra målerne i databaser. Her er det om å gjøre å finne en systematisk måte å innhente/lagre, bearbeide og presentere data på for å nyttiggjøre seg omfanget av det man faktisk har lagt opp til (akseptert) å samle inn. Det er viktig at dameier ikke drukner i data, slik at man til enhver tid har oversikt og faktisk fanger opp vesentlig informasjon om dammens utvikling. I motsatt ende av skalaen viser det seg at målinger utført kun en sjelden gang i realiteten gjør det vanskelig å gjøre damsikkerhetsmessige vurderinger da ytre forhold gjør sammenligningsgrunnlaget vanskelig. Excel og isolinjeplott har gitt ansvarlige og myndigheter en innsikt i data som er innhentet. Denne analyseteknikken er dessverre for begrenset når det gjelder realtidsdata og mer sammensatte årsakssammenhenger

Systemer muliggjør analyse av datasett over tid, noe som kan avsløre trendbrudd og kovarianser. I denne sammenhengen er det viktig å kvalitetssikre data innen den legges inn i databasen. Feil i datasettene kan i ytterste sett føre til at farlige situasjoner oppstår.



Bearbeiding og kvalitetssikring har vært enkelt å utføre der datamengdene har vært av begrenset omfang. Excel og isolinjeplott har gitt ansvarlige og myndigheter en innsikt i data som er innhentet. Men, med økt antall instrumenter, realtidsmålinger og høyere frekvens på datainnsamlingene har man for mange dammer kommet til et punkt der regneark ikke lengre er tilstrekkelig.

Dette har gjort at man i damindustrien har utviklet programmer for å forenkle arbeidet. Som beskrevet i 2.3.3 har måledata for dammer (Norconsult/ISY JobTech) blitt benyttet av en del dameiere i Norge, men dette programmet er ikke i omfattende bruk i dag. I Sverige har Intellidam blitt valgt som programvareløsning for alle dammene til Fortum og Statkraft.



Figur 21 Skjermbilder fra Intellidam.

Internasjonalt finnes det en rekke andre programmer for analyser og datainnsamling. Disse kan, som måledata for dammer og Intellidam, analysere og presentere data mer helhetlig. Mange av programmene er brukervennlige, fleksible, kan hente data i realtid, skille på rådata og kvalitetssikret data samt hjelpe til med å analysere større mengder data og presentere dette på forskjellige vis.

Ved store datamengder blir GIS-baserte løsninger spesielt aktuelle, da disse forenkler analyser og kan gi en økt forståelse av faktiske fysiske forhold gjennom visualisering av dataserier i tid og rom.

Tabell 10 Program kan benyttes for instrumentering av dammer, basert på (CEATI, 2013), (ICOLD, 2016). Listen er ikke komplett og det skjer en kontinuerlig utvikling.

Navn	Leverandør	Webadresse
ARGUS	Soil Instruments, UK	soil.co.uk/products/monitoring-software/argus-monitoring-software/
ATLAS	Slope Indicator Co, Mukilteo, WA, USA	slopeindicator.com/atlas/atlas-overview.html
AvaNet	AVA Monitoring AB, Göteborg, Sweden	avamonitoring.com/
Canary Systems	Canary Systems Inc., New London, NH, USA	canarysystems.com
Cautus Web	Cautus Geo, 3400 Lier, Norway	Cautusgeo.com
Conwide	Conwide AB, Fagerhult, Sverige	conwide.se
DamData	Ofiteco, Spain	ofiteco.com/en/business-areas/dam-reservoirs/damdata
DamSmart/Net	URS Corp	damsmart.com / damnet.com

GEOSCOPE	SolData, Nonterre, France	sixense-soldata.com/en/dams/
GeoViewer og Vista Data Vision	RST Instruments, Coquitlam, BC, Canada	rstinstruments.com/Analysis-Software.html
HoleBASE	Keynetix Ltd. , Redditch, UK	keynetix.com/holebase
HYDSTRA	Kisters AG	kisters.net
MissionOS	Maxwell Geosystems, Sheung Wan, Hong Kong	maxwellgeosystems.com/
iSiteCentral	Geocomp Corporation, Acton, MA, USA	geocomp.com/Services/IM_iSiteCentral
Intellidam	GlobVision Inc, Canada.	intellidam.com/product.html
ISY Jobtech	Norconsult, Norge	nois.no/produkter/fdv-og-eiendomsforvaltning/isy-jobtech/
Vista Data Vision	Vista Engineering, Reykjavik, Iceland	vistadatavision.com

Dataprogrammene ovenfor har alle varierende grad av datainnsamling, database-bygging, analyse og presentasjon. De fleste har web-brukergrensesnitt og mulighet til å presentere data i kartform med GIS.

5.1 Etablering av grenseverdier

Innsamlede data kan være basis for å etablere grenseverdier for instrumentene. Ideelt bør det finnes to alarmnivåer, slik at man raskere kan reagere korrekt i ekstreme situasjoner. De to nivåene er beskrevet i Tabell 11 Alarmnivåer for en dam.

Tabell 11 Alarmnivåer for en dam.

Driftsnivå	Tiltak
GRØNT	Normal drift
GULT	Skjerpet overvåkning, hyppigere inspeksjoner av dammen
RØDT	Tiltak iverksettes for å bedre sikkerheten

Det finnes ulike metoder for å etablere grenseverdier som ligger til grunn for alarmnivåene. Typisk kan dette deles inn i tre modeller; statistisk, deterministisk og hybrid modell (Icold Bulletin 158). Nevrale nettverk er en annen mulighet, som er mer ressurskrevende men som kan behøves i komplekse anlegg der dambrudd ikke fremkommer lineært, men kommer som et resultat av flere faktorer.

Om man baserer grensenivåene på flere parametere kan dette gi ytterligere informasjon og kunne begrense unødvendige alarmer. For eksempel kan man koble lekkasje og nedbør, der økende lekkasje i sammenheng med intenst regn ikke behøver å bety det samme. Videoovervåkning kan også gi god tilleggsinformasjon.

Statistisk

Om det finnes lange tidsserier med data kan man legge nivåene etter avvik fra den naturlige variasjonen. Denne sannsynlighetsbaserte metoden baserer seg på at målingene i dag ligger innenfor akseptable verdier. Modellen må kalibreres innen den tas i drift, men kan forholde seg forholdsvis få parametere -som lekkasje og bevegelser i dammen.

Deterministisk

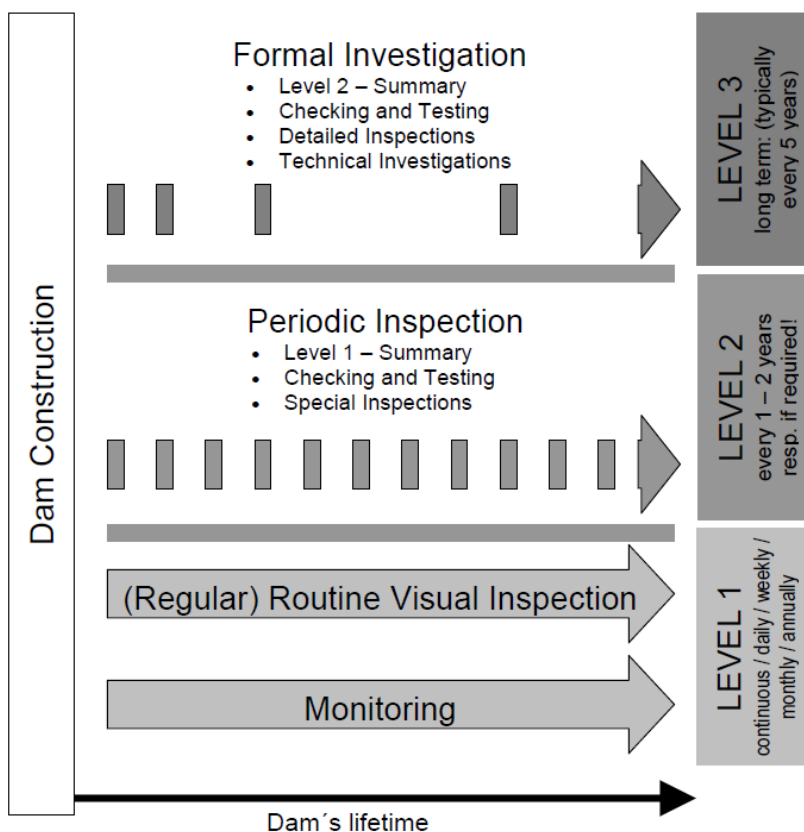
Modell kan benyttes for å beregne hvor mye dammen kan håndtere via f.eks. FEM. For betongdammer er dette mulig og det finnes flere eksempler på dammer i Europa og USA der statiske modeller brukes som grunnlag for overvåkning. Fyllingsdammer krever geotekniske modeller med vannmoduler, noe som bygger på god kjennskap til oppbygning og materialer. Deterministiske modeller krever større mengder instrumentering for å ta bort usikkerhet (temperatur og solinnstråling er viktig for å forstå spenninger i betongdammer f.eks.)

Hybrid

Statistiske data benyttes der disse forekommer, mens modeller kan benyttes til å fylle inn data der disse mangler.

6 Internasjonal praksis

Selv om internasjonal praksis varierer kan man se at ICOLDs anbefalinger om overvåking er på linje med NVEs regelverk.



Figur 22 Visualisering av anbefalte inspeksjonsaktiviteter, fra ICOLD bulletin 158.

I de fleste land har man et regelverk for overvåking som følger anbefalingene i Figur 22, med inndeling i rutine-, periodiske og hovedtilsyn. Hovedforskjellen er hvilken instrumentering og oppfølging som kreves og etterfølges av dameierne.

6.1 Instrumentering

Leverandører av instrumentering er internasjonale, og man kan med visse unntak finne samme type (og leverandør av) instrument i dammene rundt i verden. Ved nybygging kan man med erfaringstall fra internasjonale dambygg si at instrumentering står for ca. 1% av totalkostnaden ved byggingen (kilde: ICOLD Committee Q, Dam Surveillance). Forskjeller i geologi, tilgjengelig materiale og byggeteknikker gir ulikt fokus på hvilke typer instrumentering som vektlegges.

6.2 Oppfølging og bruk

Rundt i verden finnes det en stor spredning i hvordan instrumenter følges opp og benyttes (Verdensbanken, 1993). Dette er i stor grad knyttet opp mot historikk til dammene i det gitte landet samt tilgjengelige ressurser i det offentlige.

Land som har sterke myndigheter og har opplevd dambrudd med konsekvenser har striktere retningslinjer med tett oppfølging enn land der en ikke har samme historikk. På den annen side kan land som ikke har samme ressurser i forvaltningen ha strikte regler som ikke følges opp.

I hovedsak kan man konstatere at det i andre deler av verden er større fokus på instrumentering enn i Norge. Det finnes flere årsaker til dette:

1. Økte krav til risikoforståelse
2. Dårligere strukturell standard
3. Dambruddshistorikk
4. Skjerpede myndighetskrav

Ofte er dameieren direkte ansvarlig økonomisk for eventuelle skader. Dette gjør at kraftselskap og gruveiere ofte legger ned betydelige ressurser på å dokumentere tilstand og forstå risiko.

En dårligere strukturell standard som følge av dårligere byggemateriale eller konstruksjon kan kompenseres ved å ha striktere overvåkning og eventuelle varslings- og evakueringsystem.

Italia er et godt eksempel der historikken har gitt premisser for instrumentering. Etter dambruddet i Vajont dammen 1963 ble krav om instrumentering og oppfølging skjerpet betydelig. Konkret innebærer dette at hvelvdammer skal ha oppdaterte FEM-modeller blant annet.

7 Konklusjoner

Prinsippene for dagens regelverk i Norge er gode sammenliknet med praksis internasjonalt og basert på samfunnsøkonomiske analyser. Som denne rapporten derimot viser, har tillemplingene av dette regelverket potensiale for forbedring.

I hovedsak kan man fokusere forbedringen i tre punkt;

Valg av instrumentering -instrumenteringsplaner.

Som vist i foregående kapitler benyttes det i dag et mindretall av metoder for instrumentering i Norge. For mange dammer kan det være fordelaktig å vurdere annen instrumentering som kan fange opp feilmodi på en bedre måte. En bedre tilpasset instrumenteringsplan kan dermed også føre til lavere total kostnader både av installasjon og drift.

Myndigheter og dameiere bør også i fremtiden fortsette å være observant på teknisk utvikling som kan gi besparinger og økt damsikkerhet. Resultat fra ny teknikk, bør i likhet med data fra eksisterende instrumentering granskes kritisk.

Databehandling

Datakvalitet er i mange tilfeller dårligere enn det som kreves og det finnes eksempler på at feil utstyr benyttes. Data som samles inn bør etterbehandles og analyseres i større grad enn i dag. I bransjen finnes det flere eksempler på dammer som har hatt feil i data siden 90-tallet uten at dette fanges opp.

Bruk av data

I dag er instrumenteringen i Norge nesten komplett kravbasert samtidig som at fokus er på strukturelle tiltak. Dette gjør at man får en sjekklistermentalitet, uten tanke på at instrumenteringen skal bidra til damsikkerheten. Det kan konstateres at det ikke har skjedd så mye innen dette området siden prosjekt for damsikkerhet i 1992 konkluderte med at «nye krav til eksisterende dammer i første rekke bør være krav som sikrer overvåking av dammen».

Med dette i minne bør arbeidet med NVEs nye veileder for instrumentering ha økt fokus på datafangst og dataprosessering. Krav bør være funksjonsbaserte med fokus på hva som skal oppnås. Dette er spesielt viktig da det for instrumentering er en stor utvikling samtidig som at dammene har individuelle egenskaper og problemstillinger.

Den første ICoLD-bulletinen på instrumentering fra 1969 uttrykte dette konsist ved å skrive at «Instrumentering av en dam produserer data for å angi om strukturen fungerer som planlagt, og for å gi en kontinuerlig overvåking av strukturen for å advare om eventuelle avvik som truer damsikkerheten.» Dammens oppførsel dokumentert gjennom instrumentering burde være premissgivende for eventuell ombygging.

8 Referanser

- Andersson et al, Förbättrade kontrollsystem för uppföljning av sättningar, SGI Publikation 23, 2015
- Ante Erixon, Utvärdering av kombinerad topografisk och batymetrisk flygburen laserskanning i vattenkrafttillämpningar. Energiforsk Rapport 14:11
- Bulletin 158 Dam Surveillance, ICOLD, 2012
- CEATI, Dam Safety Interest Group (DSIG), Dam safety performance monitoring and data management – best practice, Report No T082700-0210 , 2103.
- Dunnicliff et al., Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, Wiley Interscience Publications, USA, 1988.
- Dunnicliff, John. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, Wiley Interscience Publications, 1993
- Ekström och Lier, Behovsanalys för Rörelsemätningar för Dammar, Energiforsk Rapport 13:61.
- Energi Norge, Fremtidige oppgraderingsbehov av dammer, 2015.
- ESA, Sentinel mission User guide, <https://earth.esa.int>, 2016
- Internal Erosion Detection at the Røsvatn Test Site, Elforsk rapport 05:42.
- Lier, Cetinic, Ekström, Lauknes & Larsen, InSAR on embankment dams, , Energiforsk Rapport 15:202.
- Milillo et al, Monitoring dam structural health from space: Insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modeling applied to the Pertusillo dam Basilicata, Italy. 2016
- Nilsson Å, Dammsäkerhet –performance monitoring and data management, Energiforsk Rapport 14:09, 2014
- Norconsult, NVEs virksomhet for tilsyn med dammer -evaluering, OED, 2014
- NVE-T, Prosjekt damsikkerhet. Hovedrapport, desember 1992
- NVE, Retningslinjer for overvåking og instrumentering av vassdragsanlegg, 2005
- Schweizerisches Talsperrenkomitee, Dispositif d'accusculation des barrages, 2005
- Spotscale, Mätning och Modellering med Obemannade Luftfartyg (UAS) och Fotogrammetri, Energiforsk Rapport 15:154, 2015
- Stickler M, intern evaluering av leverandører for grønnlaserscanning, våren 2016
- World Bank, Regulatory Frameworks for Dam Safety -a comparative study, 2002.